

## 既設宅地に適用可能な超小型高圧噴射攪拌工法の開発

前田建設工業(株) 土木設計部 正会員 ○山内 崇寛  
前田建設工業(株) 土木設計部 正会員 川西 敦士

### 1. はじめに

東日本大震災により 1 都 8 県 80 市区町村にも及ぶ極めて広い範囲で液状化現象が発生し、特に浦安市など東京湾沿岸部の市街地や利根川下流域の埋立地等では住宅、道路、護岸等の様々な構造物に甚大な被害をもたらす結果となった。このような著しい液状化被害を受けた地域において、再度災害の発生を抑制するため、平成 23 年 11 月に東日本大震災復興交付金を活用した市街地液状化対策推進事業<sup>1)</sup> (国土交通省) が創設された。このことを受け、各関係自治体では検討委員会の設立が行われ、道路などの公共施設と宅地の一体的な液状化対策事業(以下、一体的対策と称す)の推進に向けた検討が進められてきた。

現在有力な一体的対策にセメント改良地盤による格子状地中壁工法<sup>2)</sup> (図-1) がある。格子状地中壁は深層混合処理工法(機械攪拌工法・高圧噴射攪拌工法)を用いて地盤改良を行うが、既設戸建住宅の敷地境界部分で施工するためには従来の施工機械の大幅な小型化が必要である。また、一体的対策では工事費の一部を戸建住宅の所有者が負担する必要がある、事業成立に必要な住民合意を形成するために従来工法に対して工事費の大幅な削減が強く望まれている。

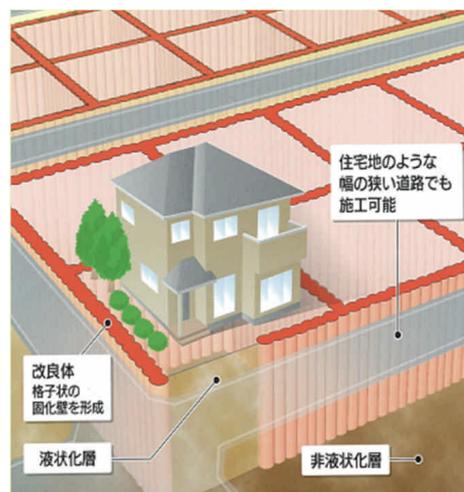


図-1 格子状地中壁工法  
市街地液状化対策自治会説明資料抜粋  
(H24 年、浦安市)

このような背景を踏まえ、一体的対策に対して経済的かつ効果的な格子状地中壁工法を提案することを目的に、小型の機械で薄壁形状のセメント改良が可能な自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法<sup>3)</sup> (以下、マルチジェット工法と称す)を採用し、更に狭隘地用に改善すること、および薄壁形状やその他の自由形状を合理的に組み合わせることで大幅なコスト削減を可能とする工法開発を行った。

なお、本研究開発は国土交通省の平成 23 年度補正予算建設技術研究開発助成制度による「震災対応型技術開発公募(液状化対策)」を受け行なった。また本研究で実施した実証実験は千葉県浦安市公募の「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」として実施したものである。本報では、本研究内容と成果についての全体概要を報告するものである。

### 2. 超小型高圧噴射攪拌工法の概要

超小型高圧噴射攪拌工法は、マルチジェット工法を既設宅地用に小型化したものである。マルチジェット工法とは自由形状改良と大口径改良を特徴とする高圧噴射攪拌工法で、図-2 に示すような扇形、壁状および格子状等の自由形状改良体を造成することが可能である。そのため、自由形状改良体を組み合わせることで、特殊な改良形状も造成することが可能であり、狭隘な施工条件下での効果的な改良が求められる宅地の液状化対策において順応性の高い様々な提案が期待できる工法である。

Title: Development of rational soil liquefaction countermeasure consisting of lattice-shape soil improvement by jet grouting for existing housing estates,  
Takahiro Yamauchi (Maeda Corporation), Atsushi Kawanishi (Maeda Corporation), Yoshimichi Tsukamoto (Tokyo University of Science)

さらに現存する工法では唯一となる建設技術審査証明<sup>4)</sup>を取得しており、平成21年1月にマルチジェット工法協会を発足以降、地盤の耐震補強や液状化対策を中心に施工実績34件（平成26年4月現在）と多数の実績を有した信頼性の高い工法である。

上記のマルチジェット工法を基本として、既設戸建住宅の敷地境界での施工を想定し施工幅1.0mと空頭2.0m程度のスペースがあれば人力で施工できる既設宅地向け超小型マシンを開発した。超小型マシンの施工イメージを写真-1に示し、機械仕様を図-3に示す。

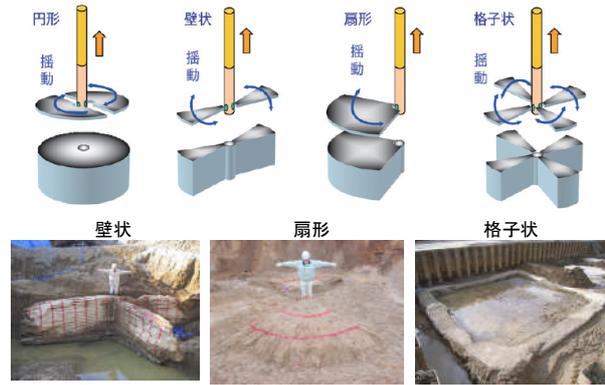


図-2 自由形状改良



写真-1 施工イメージ

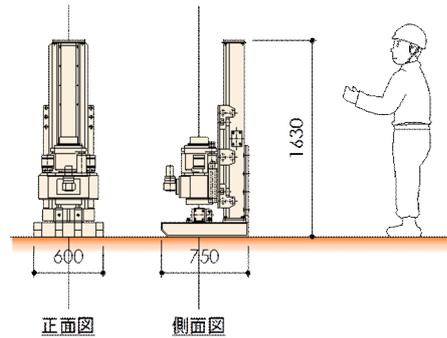


図-3 超小型マシンの機械仕様

項目	内容
ロッド径	φ73mm
ロッド長	1.5m, 1.0m
モニター径	φ89mm
最大噴射量(圧力)	200ℓ/min(30MPa)
圧縮空気量	5Nm <sup>3</sup> /min
リーダー+スピンドル重量	400kg

### 3. 研究開発内容と成果①: 合理的な改良形状の提案

#### 3.1 模型実験による合理的な改良形状の提案

本研究で開発した超小型高圧噴射攪拌工法が造成できる改良形状の中から、予備実験として振動台実験(1G場)による改良形状の可能性検討を行い図-4に示す改良形状を選定した。次に本実験として遠心载荷実験(80G場)を行い、加振中の間隙水圧および加振後の地表沈下量の計測により改良形状の効果を確認した。実験ケース表-1に示す。表中の蓋付き格子(着底)とは改良下端すべてを基盤層まで着底させたものである。蓋付き格子(一部着底)とは、隣接する道路等公共施設部分を基盤層まで着底させ、宅地部分を液状化層の途中までの浮き型としたもので、改良体模型の前面・背面の2面を基盤層まで着底させている。

遠心载荷実験の加振後の地表沈下量に対する実験結果を写真-2に示すが、改良形状による効果は、単純格子<バットレス格子<蓋付き格子の順で高い結果となった。

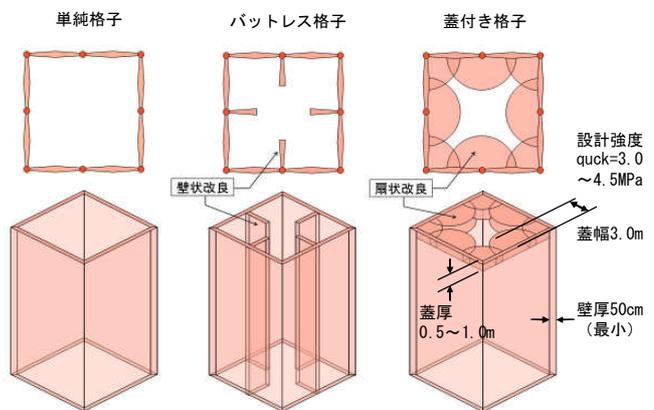
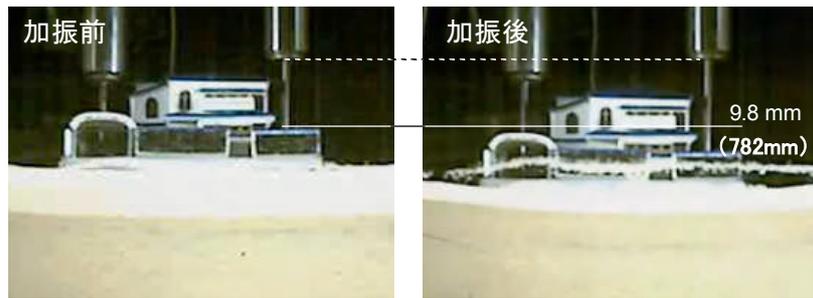


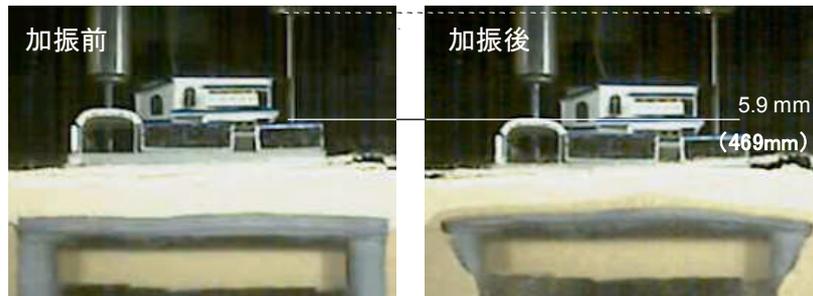
図-4 改良形状ケース

表-1 実験ケース(遠心载荷実験)

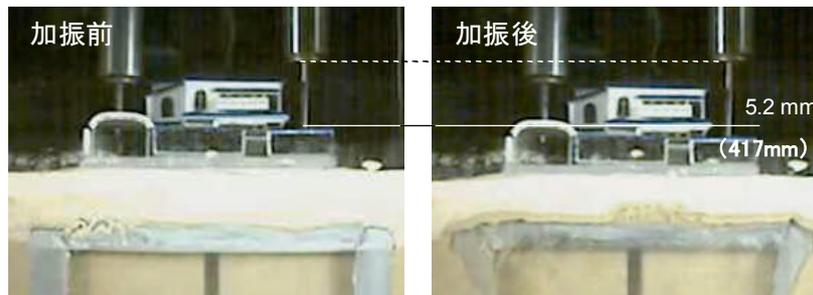
Case-01 無対策	Case-02 単純格子	Case-03 バットレス格子	Case-04 蓋付き格子 (着底)	Case-05 蓋付き格子 (一部着底)



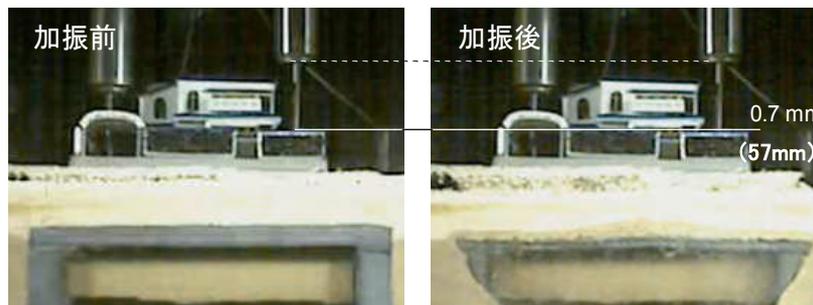
(a) Case-01: 無対策ケース



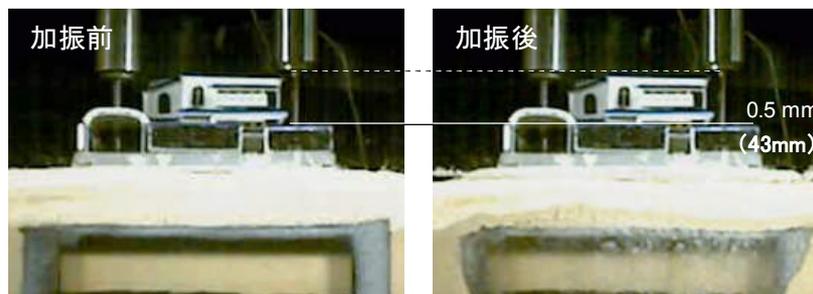
(b) Case-02: 単純格子改良ケース(着底)



(c) Case-03: バットレス格子改良ケース(着底)



(d) Case-04: 蓋付き格子改良ケース(着底)



(e) Case-05: 蓋付き格子改良ケース(一部着底)

( ) 内は実スケール換算値

写真-2 加振前後における住宅模型の沈下比較

### 3.2 三次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討

模型実験による合理的な改良形状に対し解析的に検討を行った。解析的に検討を行うには、3次元動的挙動を再現する必要があり、本研究では一般的な2次元有効応力解析として普及しているコード「FLIP」の3次元有効応力解析が可能な「FLIP3D」<sup>5)</sup>を用いた。図-5に3次元有効応力解析(FLIP3D)で用いた模型実験(遠心载荷実験)の解析モデルを、表-2に材料パラメータを示す。

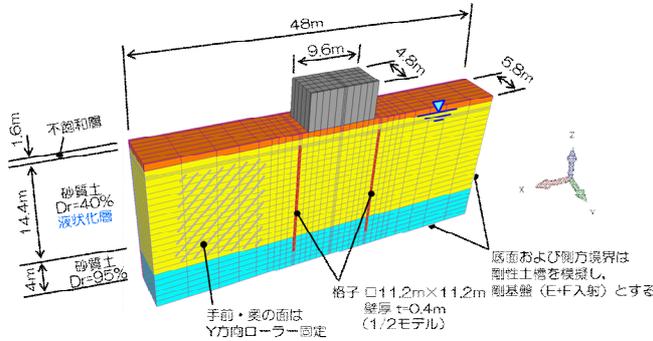


図-5 解析モデルと材料パラメータ

表-2 材料パラメータ

	不飽和層	液状化層	基盤層
湿潤密度	$\rho_t$ t/m <sup>3</sup>	1.91	1.91
基準せん断弾性係数	$G_{ms}$ MPa	52.29	52.29
ポアソン比	$\nu$	0.33	0.33
粘着力	$c$ kPa	0.0	0.0
内部摩擦角	$\phi$ deg.	38.30	38.30
細粒分含有率	$F_c$ %	10.0	10.0
履歴減衰の上限値	$h_{max}$	0.24	0.24
変相角	$\phi_p$ deg.	-	28.0
液状化特性全体の規定パラメータ	$W1$	-	6.057
液状化特性前半の規定パラメータ	$P1$	-	0.500
液状化特性後半の規定パラメータ	$P2$	-	1.025
液状化発生の下限値規定パラメータ	$C1$	-	1.600
液状化終局状態の規定パラメータ	$S1$	-	0.005

遠心载荷実験と同様の5ケース(無対策, 単純格子(着底型), バットレス格子(着底型), 蓋付き格子(一部着底型))を再現した地表沈下量の対比結果を図-6に示す。地表面沈下量に対して高い精度で再現している結果となった。

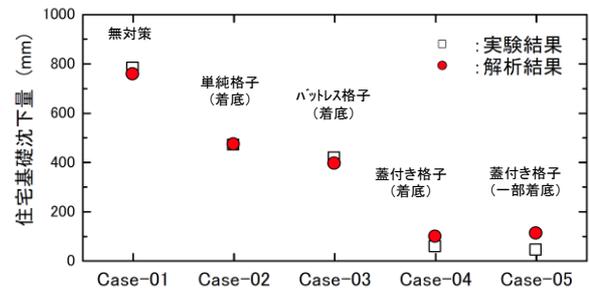


図-6 実験と解析の地表沈下量対比

単純格子と蓋付き格子の地盤の過剰間隙水圧に対する対比を図-7に示すが、蓋付き格子は格子内地盤の地表付近の過剰間隙水圧発生を効果的に軽減している。改良体の変形特性に対する対比を図-8に示すが、蓋付き格子は地表付近で地上付近の改良体変形を効果的に拘束している。その結果、地表付近の格子内地盤のせん断変形を抑え、地表付近の間隙水圧上昇を抑制したものと考えられる。

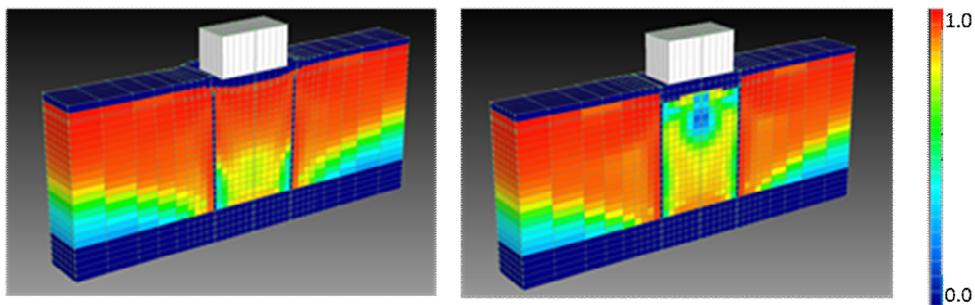


図-7 地盤の過剰間隙水圧比の対比

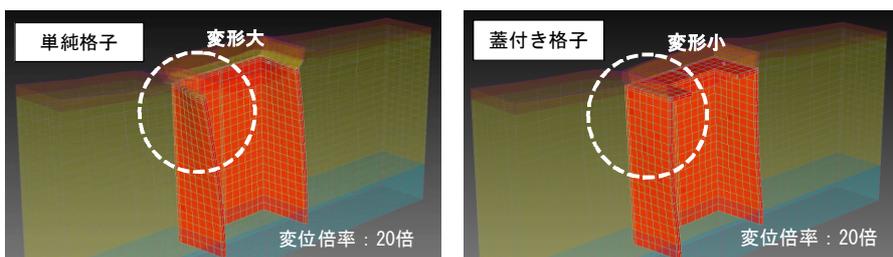


図-8 改良体の変形特性対比

## 4. 研究開発内容と成果②：合理的な改良形状の実証実験による施工性確認

### 4.1. 実証実験の目的

3章で述べた代表ケースの単純格子および蓋付き格子に対して実証実験を行なった。本実験は実際に狭隘条件と既設戸建のべた基礎を模擬し、施工性・品質・周辺への影響・改良効果について確認することで既設宅地を対象とした効果的な液状化対策の確立を目的とする。表-3に実験目標および確認方法一覧を示す。なお本実証実験は、平成24年度浦安市実証実験事業に採択され、浦安市より実証実験ヤードの提供を受け実施した。

表-3 実験目標および確認方法一覧

項目	実験目的	確認方法
①施工性の確認	狭隘地でも施工可能	・狭隘条件での施工性確認 ・施工サイクルの確認
②周辺への影響確認	既設宅地へ影響を与えない	・施工前後の振動・騒音計測 ・施工前後のレベル計測
③品質確認	計画の出来形・強度を確保	・掘起しによる出来形確認 ・サンプリングによる強度確認
④改良効果の確認	想定地震動に対し格子内地盤が液状化しない	・人工地震による効果検証 ・長期モニタリング (地震発生時に検証)

### 4.2 実証実験概要

図-9に実証実験位置図および柱状図を示す。地盤は、地下水位がGL-1.4mであり、GL-2.8～-4.2mにシルト層が介在するが、GL-9.5mまでN値5程度の細砂主体の埋土、GL-11.8mまでN値15程度の細砂主体の沖積層、GL-11.8m以深は沖積シルト層で構成される。なお、実証実験ヤードは東日本大震災において実際に液状化現象が発生した。

図-10に実証実験配置図を示す。CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の2ケースとし、単独の改良体を非液状化層に着底させて造成する。既設宅地の影響を確認するため、写真-3に示すように、地表面にはべた基礎を模擬したRCスラブ（□10m×10m、厚さ20cm）を設置した。

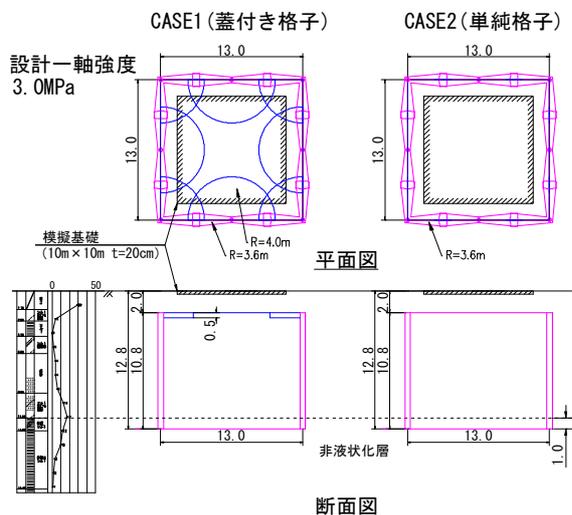


図-10 実証実験配置図



図-9 実証実験位置図および柱状図



写真-3 既設宅地を模擬したべた基礎

### 4.3 実証実験結果

#### (1) 施工性の確認

造成中の施工状況を写真-4に示す。仮設ハウスと外構を模擬した建枠を離隔1mで設置し、狭隘条件の下で施工を実施した。その際の蓋付き格子の1孔当たりの標準的な造成（2方向壁状改良＋蓋部180度）の施工サイクルを表-4に示す。標準的な施工サイクルは改良体造成を1日1本で施工が可能であり、効率的な施工が可能であることを確認した。

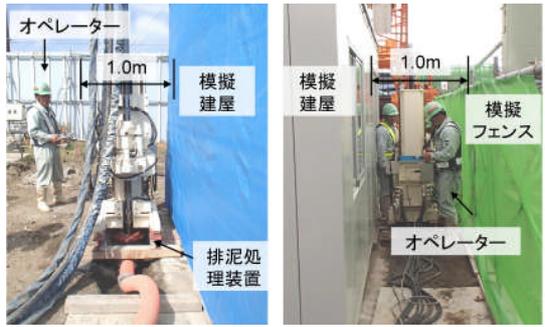


写真-4 超小型マシンによる施工状況

表-4 標準的な施工サイクル

内容	サイクル	時間
マシン移動・設置	30分/箇所	30分
削孔工	12分/m (ロッド接続時間含む)	144分
造成工	17分/m (ロッド切断時間含む)	170分
撤去・片付け	60分	60分

合計 404分  
(6.7時間)

### (2) 周辺への影響確認

施工中に模擬基礎の中央部（施工地点より約 5m 地点）において、振動・騒音の計測をおこなった。図-11 に振動・騒音結果を示す。振動は 60~70dB 程度（暗振動 35dB 程度）、騒音は 70~80dB 程度（暗騒音 60dB 程度）であった。振動は造成中の超高压ジェットの噴射に起因するものであり、騒音は造成位置に設置した排泥処理装置より発生するバキューム車の吸気音であった。いずれも造成中（約 3 時間弱）での振動・騒音であり、造成前後ではほとんど振動・騒音は発生しなかった。造成中の振動・騒音については特定建設基準値を満足している。なお、騒音の原因であるバキューム車による吸気音については、排泥処理装置の改善で対応可能である。

施工による沈下の影響についてはレベル計測を行った。最終的に 3mm 程度以下の沈下傾向を示したが、沈下量自体は小さく既設宅地への影響は小さいと考えられる。

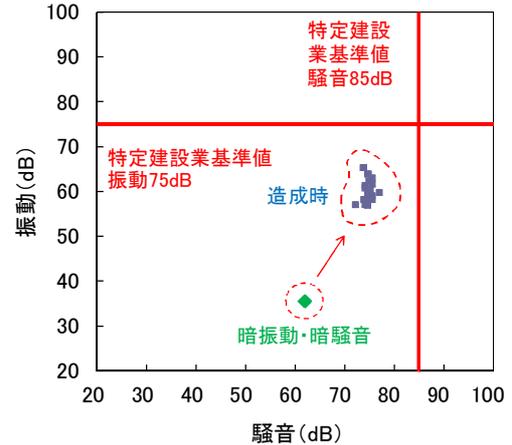


図-11 振動・騒音計測結果

### (3) 品質確認

造成した改良体の一部を掘起し、出来形確認を行った。図-12 に結果を示す。CASE1（蓋付き格子）の蓋部については、改良半径 4m の計画に対し 4.2m を確保していた。なお、噴射距離を明確にするため、改良体を外側へ 30 度追加して造成を行っている。CASE2（単純格子）では、最小壁厚は 65cm であり計画値の 50cm を満足している結果となった。改良体の強度を、掘起した改良体の一部をブロックサンプリングし、一軸圧縮強度試験と圧裂引張試験を実施した。試験結果を表-5 に示す。一軸圧縮強度および引張強度について設計値をすべて満足する結果となった。

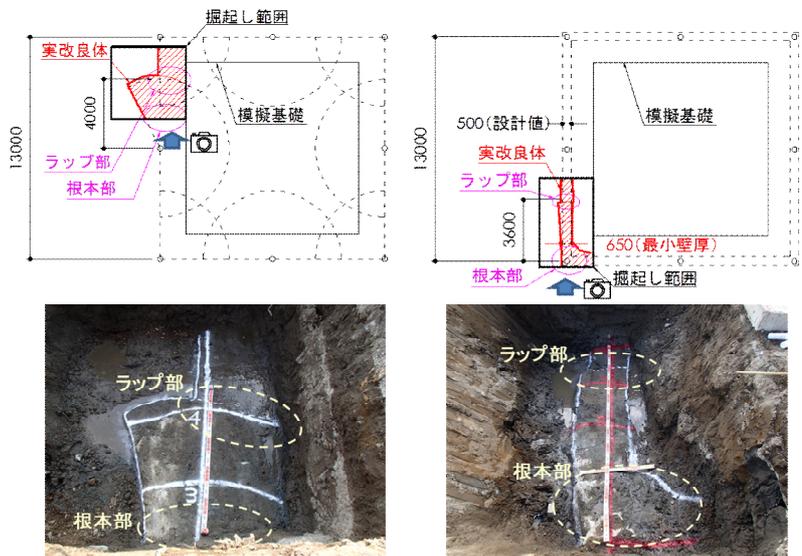


図-12 掘り起し改良体の出来形確認結果

表-5 一軸圧縮試験および圧裂引張試験

試験	一軸圧縮試 (MPa) JIS A 1218	圧裂引張試 (MPa) JGS 2551
設計値	3.0MPa	0.33MPa
ラップ部	①	0.52
	②	0.81
	③	0.76
	平均	0.70
根本部	①	0.71
	②	0.92
	③	0.65
	平均	0.76

#### (4) 改良効果の確認

無対策地盤と改良地盤（蓋付き格子・単純格子）の対策効果を確認することを目的として、原地盤（無対策）、CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の3ケースに対して、人工地震による動的載荷試験により地盤の応答値（加速度・間隙水圧）と改良体ひずみの計測を行った。人工地震は動圧密工法<sup>6)</sup>を用いて起振した。動圧密工法とは、クレーンで吊り上げた重錘を地盤へ落下させることで地盤を直接締め固める工法であり、地盤の液状化対策などに用いられている（写真-5）。表-6に人工地震仕様を、図-13に動的載荷試験概要図を示す。

人工地震仕様②において、原地盤（無対策）のGL-7m深度の応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果を図-14に示す。人工地震仕様②で計測された原地盤（無対策）の応答加速度は、1 載荷当たり平均 150gal 程度であった。過剰間隙水圧比では、1 載荷当たり 0.20~0.23 程度の上昇を計測したが、載荷後のインターバルで消散し地盤の液状化までは至らなかった。

人工地震仕様①および②において、原地盤（無対策）、CASE1（蓋付き格子）、CASE2（単純格子）の3ケースに対して、GL-7m 地点の1 載荷当たりの応答加速度と間隙水圧比で整理した結果を図-15に示す。1 載荷当たりの地盤の応答加速度と過剰間隙水圧比の関係に高い相関性が確認された。



写真-5 動的載荷試験状況

表-6 人工地震仕様

項目	仕様①	仕様②
重錘重量	10t	
落下高さ&載荷回数	落下高15m×10回	落下高20m×11回
載荷サイクル	インターバル90秒間隔	
セット数	2セット	1セット

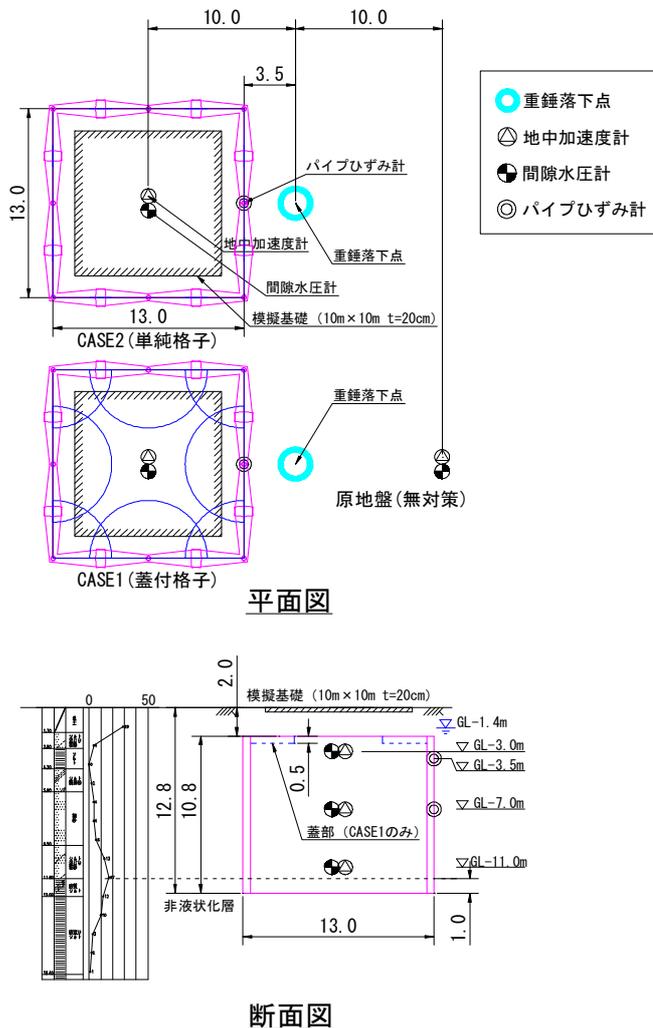


図-13 動的載荷試験概要図

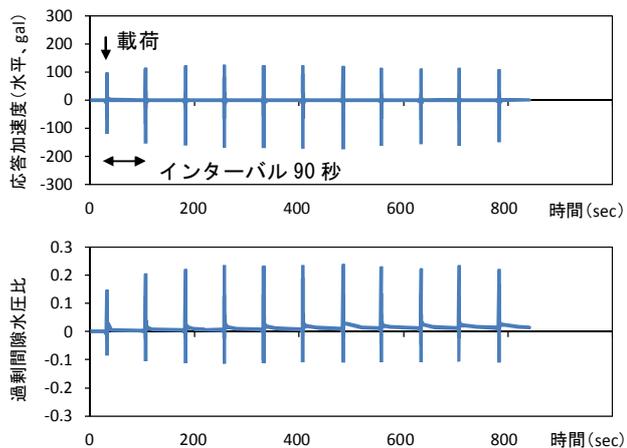


図-14 応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果  
（人工地震仕様②，原地盤（無対策）GL-7m）

応答加速度は、人工地震仕様②と比較した場合、原地盤（無対策）がもっとも小さく、CASE1（蓋付き格子）とCASE2（単純格子）が230gal程度と同程度であり、原地盤（無対策）に対して1.5倍程度大きい結果となった。これは、格子内地盤の全体剛性が増大することで、地盤のせん断変形による応答加速度の減衰が小さくなっているものと考えられる。

過剰間隙水圧比は、人工地震仕様②と比較した場合、原地盤（無対策）の過剰間隙水圧比の上昇量がもっとも大きく1载荷で0.20~0.23程度上昇しているのに対して、CASE1（蓋付き格子）では0.05~0.09程度、CASE2（単純格子）では0.10~0.14程度に抑制していることを確認した。

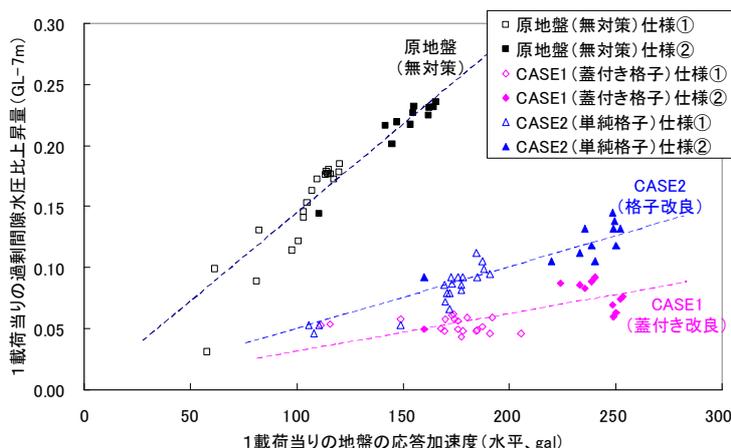


図-15 過剰間隙水圧比と応答加速度の関係  
(GL-7m, 1 载荷当たり)

## 5. まとめ

本研究は、千葉県浦安市において、道路などの公共施設と宅地の一体的な液状化対策事業である「市街地液状化対策事業」を想定し、経済的かつ効果的な改良形状の開発と実証実験による検証を行なった。

その結果、従来の格子状地中壁工法では、改良率が50%程度であるのに対し、本成果を活用すれば改良率を7~10%程度の改良率まで削減でき、従来工法に対して大幅にコストを削減できる。経済性に優れた本成果の活用で、市街地液状化対策事業の大きな課題でもある所有者合意形成の促進を期待できる。

また、開発した狭隘地向け超小型マシンを用いて、既設戸建て住宅を想定した実証実験による検証結果から、本成果の実用化については十分可能である。なお、本成果を用いれば、浦安市以外の市街地液状化対策事業は当然のことながら、その他狭隘地における社会基盤施設、産業施設等に対する液状化対策にも十分活用ができる。新たに開発した超小型マシンは、基本的に従来機と同等の性能を満足する施工仕様を確保できるように設計しているため問題はないと考えられるが、今後も超小型マシンの試験施工を実施していき総合的な品質の信頼性向上に努める所存である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：液状化対策推進事業について（国土交通省，都市局市街地整備課，報道発表資料），2011.11.29
- 2) 浦安市：市街地液状化対策実現可能性検討調査結果の概要（浦安市市街地開発課，報道発表資料），2013.01.13
- 3) 手塚広明，山内崇寛，安井利彰：新しい高圧噴射攪拌による地盤改良工法の開発，地盤工学ジャーナル vol.8, No.2, pp179-195, 2013.
- 4) （社）日本建設機械化協会：「マルチジェット工法」建設技術審査証明書，2009.06
- 5) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 6) 実用 軟弱地盤対策技術総覧,(株)産業技術サービスセンター,pp733-744,1993.11